

INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE TECHUMBRES DE VIVIENDA UNIFAMILIAR PARA INTEGRACIÓN DE ENERGÍA SOLAR ACTIVA (BIPVTA)

Esteban Felipe Zalamea, Rodrigo Hernán García y Reinaldo Sánchez
Arriagada

Cómo citar este artículo: ZALAMEA, E.F.; GARCÍA, R.H. y SÁNCHEZ, R. *Influencia de la geometría de techumbres de vivienda unifamiliar para integración de energía solar activa (BIPVTA)* [en línea] Fecha de consulta: dd-mm-aa. En: ACE: Architecture, City and Environment = Arquitectura, Ciudad y Entorno, 10 (30): 57-74, 2016. DOI: 10.5821/ace.11.30.3979. ISSN: 1886-4805.

ACE 30

Electronic offprint

Separata electrónica

INFLUENCE OF DWELLINGS ROOFS GEOMETRY IN ORDER TO INCORPORATE ACTIVE SOLAR TECHNOLOGIES BIPVTa

Key words: Solar Energy, Architectural Integration of Solar Collectors, Housing, BIPVTa.

Abstract

Architectural integration of active solar energy systems (hybrid collectors with air) on dwelling's roofs is reviewed, in recent single housing of Concepcion, Chile. Influence of volumetric configuration of roof and sides is identified. Also roof azimuth incidence was reviewed establishing that considerable deviations are allowed without losing high irradiation rates. It is concluded that irradiation levels between 73% and 39% of the domestic demand in a winter day is available on average Largest Roof Section (LRS) or Second Larger Roof Section (SLRS) indexes. Then, Building Integration Photovoltaic & Thermal with Air Cooling technology was hypothetically displayed in the highest LRS house and in the lower SLRS house. These analysis showed that, LRS case production reach a 585% of the electricity demand an average day of summer and 41% in winter. Considering the SLRS case, energy production of 185% of the electricity demand is expected an average day of summer, but in a winter day only 10%. Finally, a relationship between long sides of building to get larger roof sections for active solar potential was found.

ACE

Architecture, City, and Environment
Arquitectura, Ciudad y Entorno

C

INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE TECHUMBRES DE VIVIENDA UNIFAMILIAR PARA INTEGRACIÓN DE ENERGÍA SOLAR ACTIVA (BIPVTA)

ZALAMEA, Esteban Felipe¹
GARCÍA, Rodrigo Hernán²
SÁNCHEZ ARRIAGADA, Reinaldo³

Remisión inicial: 22-05-2015

Remisión final: 26-01-2016

Palabras clave: Energía solar; Integración Arquitectónica de Colectores Solares; Vivienda; BIPVTA.

Resumen

Se revisa la integración arquitectónica de sistemas de energía solar activa (Colectores híbridos con aire) en techumbres de viviendas unifamiliares recientes en Concepción, Chile, determinando la influencia de la composición volumétrica de faldones captadores. Se descifra la incidencia de orientación e inclinación respecto a trayectoria solar, considerando que si bien es recomendable enfrentar al ecuador, permite desviaciones importantes (hasta de 50° e incluso en 90° en azimut, dependiendo de inclinación). Se concluye que, la irradiación recolectada en invierno, satisface entre 73% y 39% de la demanda doméstica total con irradiación presente en faldones promedio de Ala de Mayor Dimensión (en adelante, AMD) y Segunda Ala de Mayor Dimensión (en adelante, AMD). Luego se estudia la posible implementación Colectores Híbridos Térmicos Fotovoltaicos con fluido aire (en adelante, BIPVTA) en casos extremos de capacidad por tamaño y geometría de los faldones. En la techumbre de mayor capacidad el abastecimiento alcanza el 585% de la demanda eléctrica en verano y 41% en invierno. Contrariamente, la configuración menos favorable en día promedio de verano, abastece el 185% de la demanda eléctrica y en invierno se prevé solo un 10%. Se encuentra finalmente que una vivienda con costados extensos, promueven faldones más amplios y aptos para captación solar activa.

1. Introducción

La compacidad de las edificaciones y aperturas adecuadamente dispuestas al sol se consideran condiciones importantes para la eficiencia energética de las edificaciones en climas templados y fríos (Charron y Athienitis, 2006; García y González, 2014). Pero además de la

¹ **Esteban Felipe Zalamea:** Arquitecto, Universidad del Bío-Bío, Chile./ Universidad de Cuenca, Ecuador. Email de contacto: esteban.zalamea@ucuenca.edu.ec

² **Hernán Rodrigo García:** Arquitecto Universidad del Bío Bío, Concepción, Chile. Email de contacto: rgarcia@ubiobio.cl

³ **Reinaldo Sánchez Arriagada:** Ingeniero Mecánico Universidad del Bío Bío, Concepción, Chile. Email de contacto: rsanchez@ubiobio.cl

eficiencia energética, incluir posibilidades de fuentes renovables dentro de las ciudades y en las propias edificaciones, se va tornando en una opción importante para lograr centros urbanos que minimicen emanaciones de CO₂ (Lund, 2012). Se hace necesario así conocer capacidades tecnológicas en cada localidad ya que irradiaciones como demandas difieren. Este trabajo tiene el objetivo de detectar el posible abastecimiento energético con captación solar activa integrada en la arquitectura, concretamente en casas unifamiliares recientes en Concepción, Chile. Revisando especialmente la configuración de techumbres en relación a las posibilidades de auto-abastecimiento energético.

La energía solar recibida en las edificaciones es variable durante el día y el año, al igual que el consumo local (Lund, 2012; Mikkola y Lund, 2014). Lograr comunidades urbanas de bajo consumo energético en las que estén contenidas edificaciones, redes de transporte y demás funciones públicas implica abastecer distintas demandas temporales, suponiendo además una distribución y almacenamiento energético inteligente denominado *Smart Grid*. Las mencionadas redes deberían abastecerse de fuentes renovables en la mayor medida posible (Carlisle et al, 2009; IEA, 2009). En las ciudades existen tipologías de edificación con aptitud superior para recolección solar acorde a localización, dimensión, proporción y altura de las edificaciones. Normalmente sectores con menor densidad y edificaciones bajas, como lo son sectores residenciales unifamiliares, poseen una alta capacidad de captación energética y pueden procurar abastecimiento a zonas de la ciudad con demandas altas diurnas (Lund, 2012; Cárdenas y Uribe, 2012).

Las viviendas unifamiliares poseen una relación de superficie de recolección solar relevante en su techumbre frente a las demandas generadas. Siendo el principal elemento de la envolvente irradiada en latitudes medias como Concepción; se trata de edificaciones con condiciones para autoabastecerse y procurar remanentes energéticos (García et al, 2014). La vivienda dentro de emprendimientos inmobiliarios se ha dimensionado como la mayor cantidad ejecutada en la actualidad, ocupando por lejos la mayor superficie de expansión reciente de la ciudad. En la comuna de Concepción, se contabilizan en los últimos seis años 3.133 unidades construidas que representan el 90,6% de permisos emitidos para la construcción de casas. Esta tipología de vivienda en la zona posee techumbres inclinadas, compuesta por secciones o faldones. De acuerdo a orientación y superficie disponible existe potencialmente un faldón que posee mayor exposición por caso para desempeñarse como captador (Zalamea y García, 2014). Bajo este precepto, por modelo de vivienda se selecciona el Ala de Mayor Dimensión (denominada AMD) como captadora potencial por superficie disponible, aunque para ser útil debe poseer una orientación adecuada. De lo contrario la Segunda Ala de Mayor Dimensión (SAMD) sería la captadora, ya que estaría dispuesta en dirección opuesta o perpendicular respecto a su AMD, es decir con una orientación adecuada (ver Figura 1). Las viviendas recientes registradas en Concepción poseen techumbres facetadas y con indicadores de superficie detectados promedio en AMD y SAMD de 0,39 m² y 0,30 m² por m² construido contabilizando el promedio de todos los casos levantados. En el estudio previo se determinó además que con colectores fotovoltaicos (PV) integrados en estos faldones se puede abastecer entre 348% y 147% de la demanda eléctrica y entre el 91% y 43% de la demanda total en balance anual (Zalamea y García, 2014).

Figura 1. Esquema de definición de AMD y SAMD



Fuente: Elaboración propia.

Los colectores en integración arquitectónica son placas captadoras conformantes de un sistema solar activo, que además de obtener energía eléctrica, térmica o ambas, deben cumplir adicionalmente la función de algún elemento constitutivo de la edificación. Es decir funcionar paralelamente como recubrimiento, filtro solar, balaustrada, sombrilla, etc. Para ello deben desempeñar adecuadamente la función de captador y de elemento compositivo funcional o constructivo, con las prestaciones materiales de cualquier elemento constitutivo como capacidad de resistencia a agentes climáticos, mecánicos y de durabilidad (IEA SHC Task 41, 2012a; Munari 2009; Kaan y Reijenga 2004).

Tanto la orientación como la inclinación de los colectores influyen en la aptitud de recolectar irradiación, pero se ha demostrado que existe una tolerancia importante frente a estos requerimientos. Con desvío respecto al norte de 45° en latitudes similares a la de Concepción, en localidades de Grecia o Chipre se observa reducción de producción de solo el 5% con adecuada inclinación. Con desvío de 45° e inclinación de 16° inferior a la óptima, se reduce la irradiación disponible entre 6% y 7%. Con un desvío importante de 90° , la reducción es 18% en irradiación anual total disponible. Es decir, aún conserva un potencial de producción importante (Bougiatioti y Michael, 2015). Reducciones similares son mencionadas por Luque y Hegedus (2011). La normativa chilena de recolección solar térmica tolera un rendimiento penalizado de hasta en 40% como consecuencia de integrar arquitectónicamente colectores, sin que implique ello la pérdida del subsidio gubernamental (CDT, 2007).

La configuración de la techumbre implica faldones con distintas formas y dimensiones, en consecuencia aptitudes para recolección solar. Es importante conocer en qué margen es posible aprovechar la irradiación acorde a configuración. Se plantea la hipótesis de captación solamente en uno de sus faldones, aquel que teóricamente más irradiación recibe. Se analiza posteriormente comportamiento de tecnología híbrida BIPVTa (Building Integrated Photovoltaic & Thermal with air fluid type), que prevé ventilación con aire de celdas PV y la energía térmica evacuada se recupera para contrarrestar demandas térmicas. Esta tecnología es factible implementar con placa metálica ondulada como base y ductos de ventilación bajo placas PV, que son placas de cobertura de techumbres habituales en viviendas de la zona. En ellas se

podría superponer celdas y placas PV adecuadas que sirvan a la vez de absorbente térmico (Solarwall, 2015; Hachem, 2012). Esta tecnología permite una fácil evacuación de excedentes térmicos, el almacenamiento es posible en masa térmica en los propios elementos constructivos de la vivienda o con intercambiadores aire-agua para colaborar con Agua Caliente Sanitaria (ACS). Es una tecnología que se ha descartado en zonas distantes al ecuador (Suecia) no obstante posee mucho potencial en zonas meridionales, a partir de latitudes semejantes a la franja sur de Canadá (45° N), en donde se ha implementado con éxito comercialmente (IEA Solar Heating & Cooling Program, 2007; Solarwall, 2015; Hachem, 2012).

2. Marco Teórico

Tecnológicamente la irradiación recolectada por células fotovoltaicas (PV) es parcialmente transformada en electricidad (entre 4% y 17%); el remanente hasta en un 70% se transforma en calor que incrementa la temperatura y disminuye la eficiencia de las células PV a razón de 0,4% por ° C (Chow 2010). Los colectores híbridos refrigeran las células por efecto de convección, lo que genera energía aprovechable para suplir demandas térmicas, a través de fluido refrigerante líquido (normalmente glicol) o gaseoso (aire). Este estudio se enfoca en recolección del segundo tipo, considerando que es una tecnología emergente que amerita ser estudiada. Concepción presenta condiciones interesantes para su aplicación debido a la alta demanda térmica sumada a una importante radiación solar.

Tabla 1. Comparación de eficiencia de térmica-eléctrica de distintos colectores híbridos PVTa

Autor	Tecnología	Eficiencia Térmica η_t (%)	Eficiencia Eléctrica η_e (%)	Observaciones
(HACHEM, C., 2012)	PVTa	37,5	12,5	Basado en modelos matemáticos.
(ITO y MIURA, 1993)		40,0	-	Fachada ventilada.
(TRIPAGNASNOSTOPOLOUS, Y. et al, 2002)		38,0	10,2-12,2	Células de sílice cristalino en colectores no vidriados.
(NAGANO, K. et al, 2003)		20,0 - 22,0 & 29,0 a 37,0	-	Comparación entre colectores. No vidriados.
(AGRAWAL, B. y TIWARI, G., 2010)		39,2	14,5	Promedio de eficiencia eléctrica con configuración de ductos, distinta disposición de corredores de refrigerante.
(SOLANKI, SC. et al, 2009)		42,0	8,4	Colectores vidriados.
(HAURANT, P. et al, 2014)		36,0	8,5	Colectores vidriados. 45° inclinación de techumbre y colectores

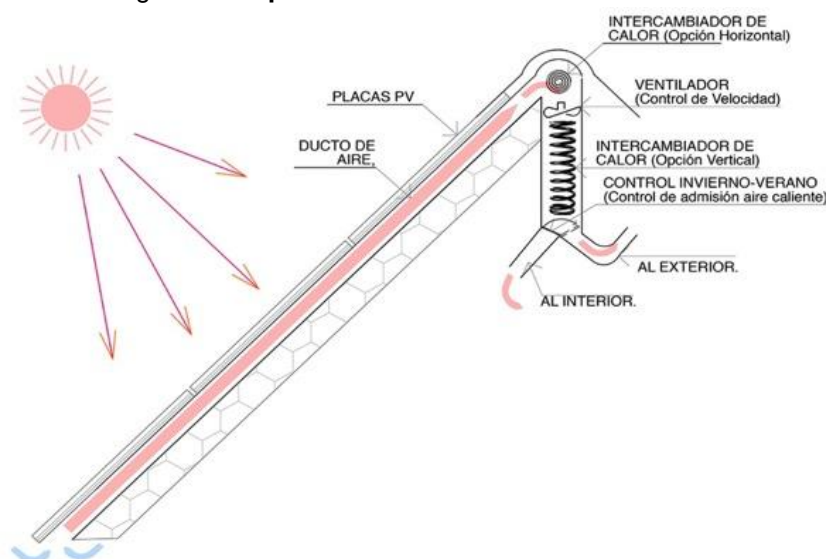
Fuente: Elaboración propia.

Más allá de la recuperación y utilización de la energía térmica obtenida por refrigeración de las celdas PV, es altamente recomendable el ventilarlas, de lo contrario pueden existir pérdidas de hasta 25% de eficiencia eléctrica por sobrecalentamiento, especialmente durante días cálidos y soleados (IEA SHC Task 41, 2012b). En consecuencia, es una oportunidad para la utilización de la temperatura que de todos modos se debe evacuar. La alternativa tecnológica híbrida

Fotovoltaica-Térmica con fluido aire (PVTa) se ha investigando ampliamente. En la Tabla 1, se señalan algunas eficiencias encontradas en la literatura. Comercialmente, el sistema está disponible en Canadá (Solarwall, 2015). En estudio de esta tecnología llevado a cabo en latitud similar a Concepción (36,48° Lat. S), en la localidad india de Srinagar (35° Lat. N), coincidentemente en una zona con alta demanda para calefacción por altitud (1600 msnm), los investigadores Agrawal y Tiwari (2010) examinan diferencias de desempeño con colectores híbridos con fluido aire. El análisis concluye que el promedio en eficiencia eléctrica está en el orden de $\eta_e = 14,5\%$ y térmica $\eta_t = 39,2\%$, con inclinación de colectores a 35°. Estos márgenes son levemente superiores a aquellos encontrados por Hachem (2012) de $\eta_e = 12\%$ y $\eta_t = 36\%$. De todos modos, se considera en este análisis la segunda eficiencia mencionada por ser más conservadora.

La refrigeración de células se produce a través de cámara de aire que discurre desde el borde inferior de faldón. El aire conforme adquiere calor sube por diferencial de temperatura y puede ser conducido al interior. Es necesario controlar la velocidad para optimizar eficiencia a través de ventilador mecánico. En verano, se supone que el aire luego de refrigerar las células, se disipa al ambiente o puede contribuir para calentamiento y precalentamiento de ACS. La refrigeración colabora también para mitigar sobrecalentamiento interior a manera de fachada ventilada. El funcionamiento es descrito en la Figura 2.

Figura 2. Esquema de recolección híbrida BIPVTa



Fuente: Elaboración propia a partir de descripción de Athienitis et al (2011) y Hachem (2012).

La forma más eficiente y económica de uso de energía solar es utilizarla directamente para abastecer demandas térmicas, fundamentalmente ACS y calefacción. La producción eléctrica PV debería destinarse a suplir demandas eléctricas o venderse a la red pública para ser utilizada como tal. Este criterio de aprovechamiento optimiza la calidad de aprovechamiento por que el valor de la energía eléctrica es superior a la térmica bajo criterio de exergía (Coventry y Lovegrove, 2003).

3. Metodología

A partir de levantamiento de la geometría y las techumbres de las viviendas de la tipología de emprendimientos inmobiliarios de Concepción (Zalamea y García, 2014), se obtiene el valor de irradiación horaria que recae sobre la superficie de los faldones en indicadores promedio de AMD y SAMD en margen horario y diario. Para ello se utiliza software *Trnsys*[®] 17 y el archivo climático *Meteonorm*[®] según la localización de Concepción. Los indicadores corresponden a la relación de superficie de faldón (AMD o SAMD) de los casos de estudio sobre el total de superficie construida. Con ello, se obtienen índices de irradiación disponible. Previamente se estableció que la orientación de viviendas y faldones es variable. Para determinar márgenes de pérdidas por variación en azimut se calcula irradiación en AMD con desviaciones de 0°, 19°, 56° y 94° complementado con desviaciones características de SAMD de 0°, 17° y 50° respecto al norte, según márgenes de desviación estadísticos que permiten una compaginación con resultados anuales detectados en estudio previo (Zalamea y García, 2014). No obstante son desviaciones cercanas y comparables a desvíos utilizados típicamente en otros estudios (15°, 45°, 90°, etc.). En primera instancia, se ejecuta una comparación de irradiación para día promedio en mes desfavorable con mínima presencia de irradiación acorde con distintas orientaciones sobre promedio AMD y SAMD por m² construido. Luego se analiza comparativamente la irradiación en AMD y SAMD, en mes interestacional y en mes con presencia de mayor irradiación.

Posteriormente se realiza el mismo proceso para casos extremos específicos, aquellos que poseen una AMD máxima y otro con una SAMD mínima, calculando la irradiación existente en días promedio de mes con superior y mínima irradiación y en mes inter-estacional. De este modo se obtiene comparativamente el abastecimiento máximo y mínimo esperable en la tipología de viviendas. Mostrándose al lector la diferencia de adoptar uno u otro tipo de techumbre respecto a la posible recolección solar activa. Por último, se compara la producción térmica-eléctrica con la integración BIPVTa, frente a demandas esperadas para los casos de estudio en días promedio de los meses mencionados.

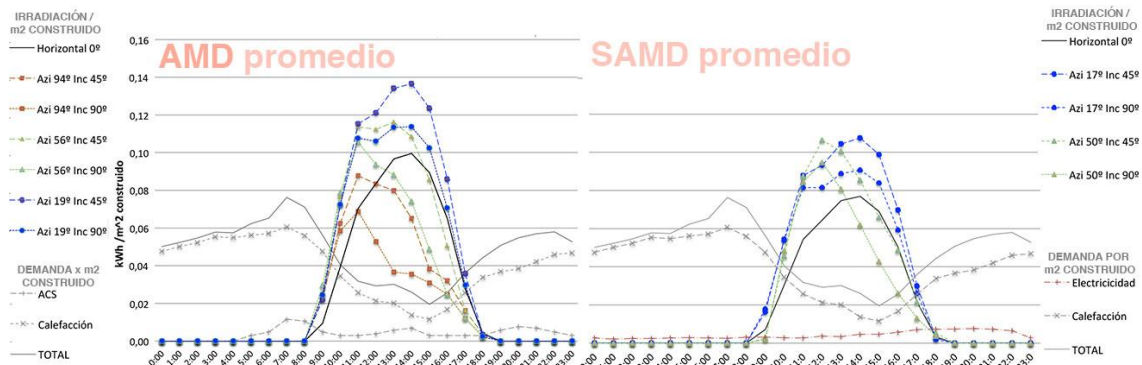
Para la recolección híbrida, se utiliza como estimación eléctrica una eficiencia de 12% y producción térmica resultante de correlacionar producción térmica/eléctrica $Q_u/Q_e = 3$, valor sugerido en un estudio previo (Hachem, 2012). La energía térmica es contabilizada como útil en día de invierno y día característico de mes inter-estacional. En verano, se desestima y se considera nulo, no obstante puede contribuir a precalentar ACS (Athienitis et al, 2011; Hachem, 2012). No se puede establecer una contribución específica para esta última posibilidad, ya que resulta de la eficiencia del intercambiador de calor, dispositivo que depende de la materialidad y configuración del intercambiador, temperaturas de ingreso y egreso del fluido, caudales, etc., lo que dificulta sentar una presunción confiable; no obstante, es una alternativa que debería analizarse a futuro.

4. Irradiación horaria y margen de abastecimiento invernal posible con AMD y SAMD

Con el objetivo de ofrecer un panorama sobre la energía solar en relación con la demanda energética por m² en el mes más crítico de invierno, se generan curvas representativas

horarias de irradiación en faldones AMD y SAMD promedio de la tipología. Se muestra irradiación disponible en faldones bajo la perspectiva de la demanda energética. La comparación horaria entre irradiación y demanda se grafica en las Figuras 2a y 2b en las que también se grafican variaciones de orientación e inclinación (Azi e Inc). Denotando, a la vez la influencia de inclinación y desviación en azimut de un eventual faldón recolector.

Figuras 2a y 2b. Comparación horaria de irradiación frente a demanda, considerando recolección en AMD (derecha) y SAMD (izquierda) frente a demanda horaria



Fuente: Elaboración propia.

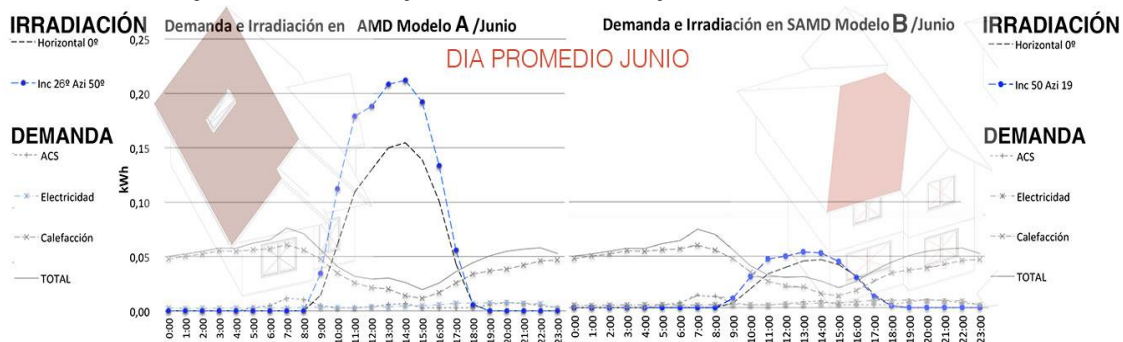
La Figura 2a muestra la irradiación esperada por superficie construida en indicador promedio de faldón AMD de $0,39 \text{ m}^2$ por m^2 construido de casa. Con pendiente de 45° y baja desviación (19°) en día promedio de mes de verano se observa la más alta recolección. Se estima que se puede recibir diariamente en junio $0,853 \text{ kWh/m}^2$; no obstante con desviación de 94° respecto al norte y pendiente de 45° se reduce esta capacidad a $0,499 \text{ kWh/m}^2$ al día. Este dato refleja un potencial inferior en 42% respecto a la situación con poca desviación e incluso 17% inferior a superficie SAMD con poca desviación. Al ser estimación en día de invierno, la trayectoria solar en baja altitud, las pendientes pronunciadas bien orientadas presentan una alta captación, pero son penalizadas en mayor medida por desviaciones en azimut respecto a pendientes de faldones inferiores.

La Figura 2b muestra la irradiación en indicador SAMD promedio por m^2 construido. Diariamente se espera reciba $0,67 \text{ kWh}$ por m^2 construido considerando el ala dispuesta con desvío mínimo en azimut de 17° e inclinación de 45° . Este mismo indicador considerado horizontalmente, recibe $0,452 \text{ kWh/m}^2$ construido al día. Al comparar estos rangos con la demanda diaria doméstica promedio de junio estimada en $1,16 \text{ kWh/m}^2$, entonces la irradiación sobre indicador SAMD cubre entre 57,3% y 38,9% de la demanda total. Frente a un requerimiento eléctrico estimado de $0,096 \text{ kWh/m}^2$ día, se percibe entre 4 y 5 veces en energía solar durante el mes menos favorable. Esta magnitud implica que con eficiencias entre el 15% y 20% (factible con PV) puede ser cubierta la demanda eléctrica diaria promedio invernal.

También se compara irradiación en indicadores mínimo y máximo en AMD y SAMD de casos extremos puntuales. El indicador más alto es AMD de $0,612 \text{ m}^2 / \text{m}^2$ construido con pendiente de 50° procedente del que denominaremos en adelante Modelo A, el indicador mínimo se encuentra en el que denominaremos Modelo B, el cual posee en su faldón SAMD tan solo $0,125 \text{ m}^2 / \text{m}^2$ construidos y pendiente cercana a 25° (Figura 5). Se estudian los dos

comparativamente y se encuentran curvas de potencial irradiación utilizable por m² de los casos extremos de la tipología, mostrando una comparación de producción posible frente a demandas diarias típicas (Figura 3). El modelo con inferior potencial por superficie y además con alta desviación (50°) puede obtener entre 0,27 y 0,34 kWh/m² construido diario (entre 25,5% y 29,3% de demanda de invierno). El modelo con superior potencial se recibe entre 0,91 y 1,32 kWh por m² construido (entre 78,3% y 113,8% de la demanda diaria de invierno). En resumen la opción con superior potencial recibe 1.314,6% en irradiación respecto a demanda eléctrica. Se concluye que la energía que se obtiene en una de las alas de techumbre de la tipología más apta puede abastecer entre 3 y 12 veces la demanda en día promedio de mes con mínima irradiancia. No obstante para cubrir demandas residenciales se requiere tanto captación como distribución en espacio y tiempo eficientes con pérdidas mínimas en el caso térmico, para el caso eléctrico la conversión a electricidad, conlleva reducción de demandas superiores.

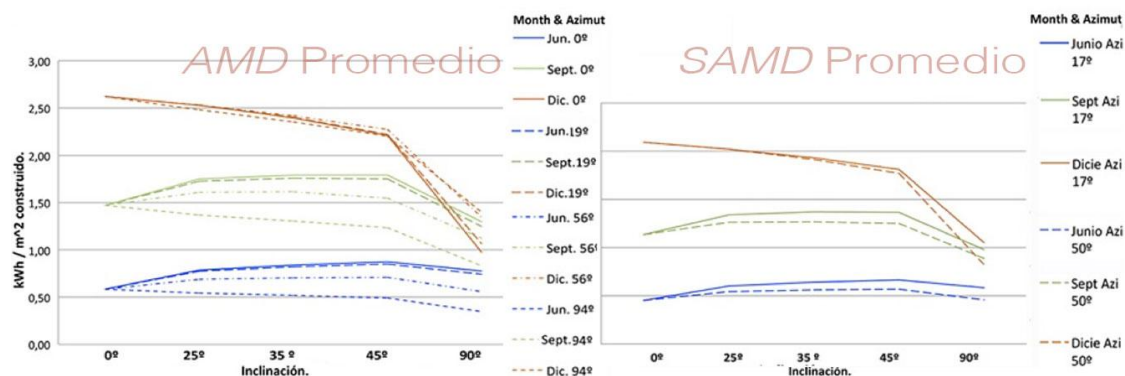
Figura 3. Comparación horaria de irradiación frente a demanda en casos extremos para día de junio: SAMD - B y desviación de 50° y AMD - A con desviación 19°



Fuente: Elaboración propia.

Se grafica además la variación de irradiación por orientación e inclinación. Con captación desviada en 50° la irradiación se incrementa en la mañana obviamente (en latitud Sur), alcanzándose un máximo alrededor de las 11 am y penalizando la incidencia neta diaria solamente en 12,5% por causa del mencionado desvío. La Figura 4 muestra la irradiancia horaria en concordancia con variaciones en inclinación y azimut en meses extremos e interestacional sobre AMD y SAMD promedio por m² construido. Esta gráfica señala justamente que a mayores pendientes, la variación en azimut provoca una disminución consistente en la capacidad de recolección frente a las reducciones mostradas en pendientes leves; al alcanzar la disposición horizontal variaciones en azimut obviamente no implican pérdidas. Por otro lado, existe captación inferior en colector horizontal en época interestacional e invernal frente a implantar colectores verticalmente con orientación cercana al norte. El gráfico muestra mayor irradiancia captada en colectores inclinados 45° respecto a aquellos dispuestos horizontalmente o inclinados a 25°, exceptuando en día promedio de verano cuando la captación cercana a la horizontal predomina. La irradiación en promedio AMD supera entre un 10% y 25% respecto al promedio alcanzado en SAMD, denotando sin embargo que la segunda ala posee un potencial también relevante.

Figura 4. Irradiancia recibida en AMD promedio (5a) y SAMD promedio (5b) durante día promedio de junio, diciembre y septiembre, acorde a orientación e inclinación



Fuente: Elaboración propia.

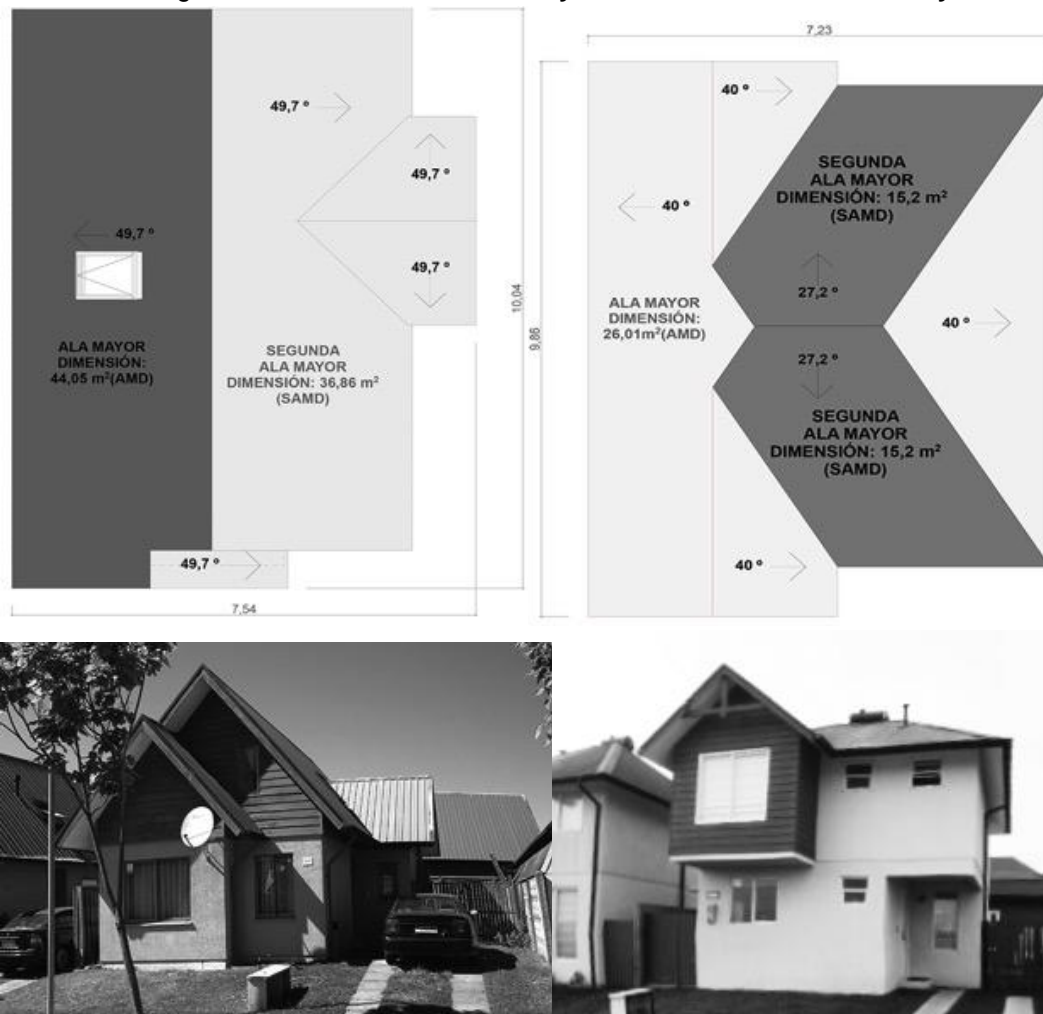
5. Estimación de aprovechamiento de energía solar frente a demandas características con colectores híbridos integrados arquitectónicamente en techumbres BIPVTa

Obtenidas las irradiaciones en consecuencia de la disposición solar de faldones y a partir de la eficiencia térmica-eléctrica de la tecnología propuesta BIPVTa, es detectable un posible margen de producción de energía *versus* abastecimiento doméstico acorde a indicadores de superficie captadora disponible en faldones estudiados. Para ello, se adoptan los casos con máximo y mínimo potencial *A* y *B*, determinando los extremos absolutos de potencial de la tipología, comparando a la vez el resultado de adoptar una tipología de techumbre frente a otra en términos de energía recolectable. Una descripción gráfica de todos los casos está disponible en el levantamiento publicado en estudio previo (Zalamea y García, 2014).

5.1 Casos de estudio

Las techumbres de los modelos *A* y *B* son representadas en la Figura 5. La *Tabla 2* compara aspectos geométricos relevantes de ellas. El AMD de modelo *A* posee tres veces más superficie que la SAMD de modelo *B* y posee 10% menos superficie habitable. Ambas poseen similar número de faldones, no obstante la dimensión del faldones de modelo *B* muestran mayor homogeneidad tanto en superficie como formas triangulares-trapezoidales, mientras el modelo *A* posee dos faldones amplios y tres complementarios pequeños. Ambas casas presentan similar condición constructiva, en planta baja material sólido, el sistema portante de planta alta es de estructura liviana (madera y acero galvanizado) con recubrimiento de placas tingladas aglomeradas con aspecto maderado al exterior, yeso estucado y pintado al interior, aislamiento intermedio y techumbre de placa metálica ondulada de acero. Los recubrimientos de paramentos son de iguales características. La carpintería de las ventanas al exterior son de aluminio y vidrio simple. Originalmente, no poseen sistema de calefacción pero están configuradas para instalación de combustión lenta a leña. La composición descrita corresponde en buena medida a la descripción de la vivienda típica de dos plantas de la zona centro-sur de Chile (Celis et al, 2012)

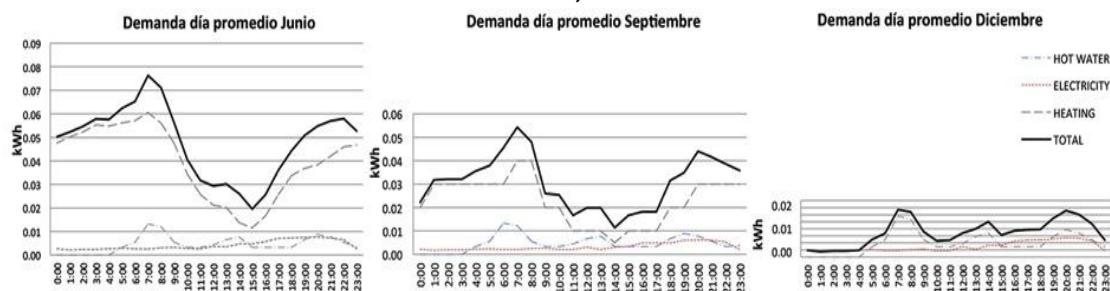
Figura 5. Plantas de techumbre y vista exterior de modelos A y B



Fuente: Elaboración propia.

Las demandas para calefacción se determinan a partir de simulaciones anuales de modelos de iguales características y materialidad por m^2 , efectuado por el grupo CON*FIN Research Group (2015). ACS se considera a partir de una demanda media de 60 l por persona o 240 l por vivienda (considerando 4 personas por habitación de acuerdo a estadística nacional; INE, 2002). La demanda eléctrica se obtiene desde encuestas de boletas de consumo. Sin embargo el lector debe considerar que las demandas energéticas de viviendas responden a múltiples factores adicionales como: Capacidad socio-económica, equipamiento, fuente energética primaria y secundaria, eficiencia de dispositivos y fundamentalmente comportamiento o sensibilidad de usuarios, entre otros factores, lo cual puede distorsionar en gran medida cualquier supuesto o simulación que se plantee (Op 't Veld y Van der Aa, 2014). Estas estimaciones son referenciales y cada caso debe ser analizado individualmente, con datos en lo posible más cercanos a los ocupantes reales, es decir con conocimiento oportuno de comportamiento de uso probable.

Figura 6. Comparación de demanda residencial horaria en días característicos de invierno, verano e inter-estacional



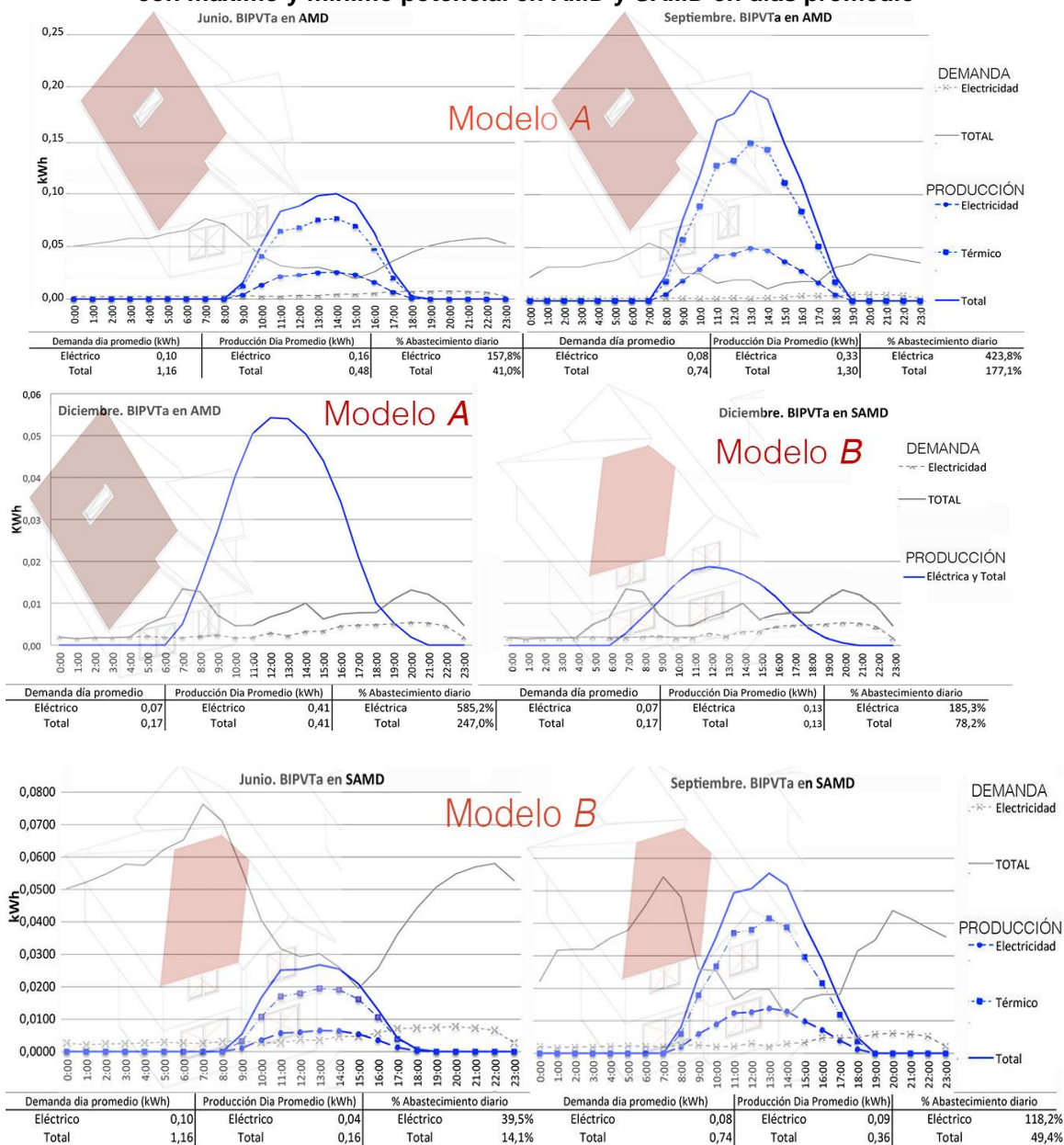
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6 describe una distribución tentativa resultante de demanda promedio diaria característica y horaria (electricidad, ACS y calefacción) para días promedio por estación. Las demandas se distribuyen en requerimiento horario desde simulación de calefacción y uso esperado en familia con cuatro habitantes, suponiendo un comportamiento de dos adultos trabajando con dos hijos estudiantes (Electricidad y ACS). El requerimiento para día invernal se estima en $1,16 \text{ kWh/m}^2$, disminuyendo a $0,74 \text{ kWh/m}^2$ para septiembre y $0,17 \text{ kWh/m}^2$ en verano. En día inter-estacional y estival, el requerimiento es 63,8% y 14,7% respecto a la demanda de invierno. No se considera demanda para aire acondicionado ya que Concepción y la tipología de vivienda no poseen este equipamiento por lo general, se considera que se evita el sobrecalentamiento con una correcta ventilación y un adecuado sombreado en vanos. En comparación entre día promedio de verano y de invierno la demanda es nueve veces inferior y la irradiancia en superficie horizontal es 4,6 veces superior. Se tratan de datos promedio que pueden variar sustancialmente en días extremos de estación (un día cálido y soleado de verano o uno frío y sombrío de invierno).

5.2 Comparación entre producción con colectores solares BIPVTa (Building Integrated Photovoltaic & Thermal Collectors air type) y demanda residencial

Se analiza el comportamiento hipotético de colectores híbridos con fluido aire en casos A y B. Se considera modelo con AMD superior desplegado con baja desviación de 19° respecto al norte (condición con buena orientación) y su contraparte modelo con captación AMD inferior y alta desviación respecto al norte solar de 50° (situación con mínimo potencial). La producción se calcula horariamente en ambos modelos en día promedio de invierno, verano e inter-estacional. Se calcula el abastecimiento térmico para calefacción en días de invierno e intermedio estacional, a través de aire precalentado descrito con antelación. Los márgenes horarios encontrados se describen en la Figura 7.

Figura 7. Comparación producción-demanda con recolección BIPVTa en techumbres con máximo y mínimo potencial en AMD y SAMD en días promedio



Fuente: Elaboración propia.

El caso con mejor desempeño (captación con AMD) muestra un aprovisionamiento entre tres veces (diciembre) y cuatro veces (junio) superior respecto al modelo con captación mínima (SAMD inferior). En el modelo B se observa abastecimiento total al medio día en junio (Coincidencia entre demanda y provisión). No obstante, la demanda térmica del resto del día y noche supone que en el balance diario se cubra un poco más del 10% en balance diario, aunque la producción PV abastece prácticamente un 40% de la demanda eléctrica. En día de

verano promedio por el contrario, se obtiene 185% de la demanda eléctrica y 78% de la demanda total. En el modelo A con captación AMD permite una producción eléctrica con excedentes, incluso durante el invierno durante las horas próximas al medio día. Este caso, en verano, la producción eléctrica supera prácticamente en seis veces la demanda, con abundante exportación a la red pública. La producción térmica estival no graficada es abundante (3 veces superior a la eléctrica). Los excedentes en combinación con intercambiador de calor podrían abastecerse en gran medida demanda de ACS durante días de verano y alta irradiación, con lo cual se podría superar aún más el abastecimiento posible aquí medido.

Finalmente, al comparar las geometrías de las viviendas estudiadas, sus techos y capacidad de aprovisionamiento, se observan relaciones cercanas entre dimensión, cantidad de faldones o alas e incluso superficie total de las cubiertas. No obstante, por el diseño y partición de faldones y orientación, implica que la superficie de captación en AMD del modelo A sea prácticamente tres veces superior a SAMD de modelo B. Ello sumado a factores de inclinación y orientación, conlleva a una producción casi cinco veces superior en septiembre y tres veces en verano, en consecuencia de inclinaciones favorables (inclinación superior de modelo A potencia la captación de invierno cuando la demanda es más exigente) y la desviación en azimut inferior (Tabla 2).

Tabla 2. Relaciones de Geometría de vivienda, techumbre y abastecimiento

Modelo	Superficie Construida (m ²)	# Alas de Techumbre	Superficie de techumbre (m)	Superficie Captadora utilizada AMD o SAMD (m ²)	Longitud de muro soporte de AMD SAMD	% Abastecimiento Día Promedio junio.	% Abastecimiento Día Promedio septiembre.	% Abastecimiento Día Promedio diciembre. (Electricidad)
A	71,9	5,0	94,6	45,0	9,3	41,0%	177,1%	585,2%
B	79,0	6,0	82,4	15,2	3,4	10,2%	37,0%	185,3%
Indicador (A/B)	0,9	0,8	1,1	3,0	2,7	4,0	4,8	3,2

Fuente: Elaboración propia.

6. Conclusiones

Se muestra un estimado de irradiancia disponible y de abastecimiento térmico – eléctrico frente a demandas energéticas características en viviendas. Se analiza tipología con mayor desarrollo en Concepción, Chile, bajo indicadores promedio y casos concretos extremos de techumbre con Ala de Mayor Dimensión (AMD) y Segunda Ala de Mayor Dimensión (SAMD). Se sintetiza que existe hasta diez veces más energía en irradiación respecto a la demanda eléctrica en mes de invierno, en recolección en indicador AMD promedio de la tipología frente a superficie construida; inclusive, con indicador SAMD promedio, existe tres veces más irradiación respecto a la demanda eléctrica. Además se observa una relevante incidencia de la orientación cuando la pendiente de faldón es elevada en días de invierno especialmente, lográndose obtener 48% más de energía en junio, respecto a recolección horizontal y 33% más con pendiente de 25°.

No obstante en faldón AMD con desvío de 90° y alta inclinación (49°), se estima inferior irradiación respecto a SAMD bien orientada (17° de desviación).

Los dos casos extremos seleccionados se someten a estudio con captación solar activa BIPVTa. El modelo de mayor aptitud muestra en un día de verano, una producción eléctrica seis veces superior a la demanda estimada, y dos veces y media respecto a la demanda total. Esta misma vivienda bajo mínima irradiación (junio) obtiene una vez y media la demanda eléctrica y 41% de la demanda total, considerando calefacción inclusive. Para septiembre, existe un excedente eléctrico para la venta a la red correspondiente a 75% respecto a la demanda; y la producción total, incluyendo la térmica se supera en 177% respecto al total; en consecuencia, parte de ella debe disiparse o utilizarse para precalentamiento de ACS. El modelo de inferior aptitud, para el mes de junio, cubre solamente 10% de la demanda total y 40% de la demanda eléctrica, además la venta a red eléctrica es nula y el aprovechamiento térmico alcanza a cubrir la demanda solamente al medio día. No obstante, para verano existe un excedente eléctrico en el balance diario en 185%, aunque en margen de balance global cubre solamente el 78% de la demanda total. En términos generales, la vivienda con mejor configuración presenta un potencial de abastecimiento entre tres y cuatro veces superior frente al de inferior potencial. Adicionalmente, el caso con superior potencial, muestra regularidad formal en faldón (y también en planta), denota mayor facilidad constructiva de techumbre y evidencia facilidad para implementación de canales o ductos de aire dispuestos paralelamente bajo las placas PV.

En comparación geométrica general de ambas viviendas, existe similitud entre la superficie construida, superficie de techumbre e incluso número de faldones. No obstante, el diseño de la techumbre y sus faldones implica que por superficies generadas, pendientes y orientación, existe una producción entre 3,2 y 4,8 veces superior dependiendo la época. También se observa una correlación entre muros longitudinales largos los que tienden a provocar faldones extensos que, al disponerse enfrentando al norte o cercano al norte, tienden a lograr extensiones más aptas de techumbre, las cuales bien orientados presentan potencial con excelente irradiación. Aunque esto también puede ser provocado con plantas irregulares, regularizando formalmente la techumbre por ejemplo con el uso de soportales.

Este estudio de irradiaciones y producciones promedio frente a demandas características posibles, debe considerar también la adopción de medidas pasivas. Los márgenes aquí detectados pueden mejorar significativamente en viviendas más eficientes con menor demanda, logrando viviendas *Net-Zero* e incluso con balance positivo la mayor parte del año y reduciendo los pronunciados desbalances de invierno. Se logra exponer el potencial existente y la relación entre geometría-producción y un margen global importante de abastecimiento. Sin embargo, para datos más precisos, deberían simularse los casos bajo condiciones dinámicas precisas de captación solar y demandas acorde al uso específico de habitantes, lo cual permitiría entender los desbalances energéticos en días extremos estacionales en que los desbalances serían aún más pronunciados. La tecnología BIPVTa también muestra un potencial muy fuerte acorde a las eficiencias publicadas en otras latitudes. En consecuencia, los resultados favorables de este trabajo son un llamado para el estudio más profundo de la tecnología híbrida con prototipos bajo las condiciones climáticas y constructivas locales.

Agradecimientos

Este trabajo fue parte de programa de investigación Conicyt CONFIN AKA-ERNC 007, (Chile, Conicyt 912, 2013). Se agradece a la *Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación del Ecuador, SENESCYT* por el aporte financiero. Y a la Lic. Cecilia Suárez Moreno, PhD (c) por la corrección de escritura.

Bibliografía

AGRAWAL, B. y TIWARI, G.N. *Optimizing the energy and exergy of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems under cold climatic conditions*. En: *Applied Energy*, 87 (2): 417-426 [en línea] Fecha de consulta: 26 de enero de 2016). Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.011>>. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2009.06.011. 2010.

ATHIENITIS, A.K.. *Design of a solar home with bipv-thermal system and ground source heat pump*. En: *Canadian Solar Buildings Conference (2nd, Calgary,2007)* Calgary, Canadian Solar Buildings Conference, 2007, pp: 1-9.

ATHIENITIS, A.K.; BAMBARA, J.; ONEILL, B. y FAILLE, J. *A prototype photovoltaic/thermal system integrated with transpired collector*. En: *Solar Energy*, 117 (1): 403-410 [en línea] Fecha de consulta: 26 de enero 2016). Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.10.008>>. ISSN 00012505. DOI 10.1016/j.solener.2010.10.008. 2011.

BOUGIATIOTI, F. y MICHAEL, A. *The architectural integration of active solar systems. Building applications in the Eastern Mediterranean region*. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47: 966-982 [en línea] Fecha de consulta: 26 de enero 2016). Disponible en: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115001835>>. ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2015.03.030. 2015.

CÁRDENAS, L. y URIBE, P. *Acceso solar a las edificaciones: El eslabón pendiente en la norma urbanística chilena sobre la actividad proyectual*. En: *Revista de Urbanismo*, 26: 21-42, 2012.

CARLISLE, N., VAN GEET, O. y PLESS, S.. *Definition of a « Zero Net Energy » Community*. Golden, National Renewable Energy Laboratory. 2009. 20 p.

CDT. *Sistemas Solares Térmicos* [en línea] Fecha de consulta: 26 de enero de 2016). Disponible en: <<http://informatica.cdt.cl/documentos/publicaciones/index.php?opcion=publicaciones>>. ISBN 9789567911097. 2007.

CELIS, F., GARCÍA, R.; TREBILCOCK, M.; ESCORCIA, O. y DIAZ, M. *Análisis energético de las viviendas del centro-sur de Chile*. En: *Arquiteturarevista*, 8: 62-75. ISSN 18085741. DOI 10.4013/arq.2012.81.07. 2012.

CHARRON, R. y ATHIENITIS, A. *Design and Optimization of Net Zero Energy Solar Homes (AE)*. En: *ASHRAE Transaction*, 112: 285-296. 2006.

CHOW, T.T. *A review on photovoltaic / thermal hybrid solar technology*. En: *Applied Energy*, 87 (2): 365-379 [en línea] Fecha de consulta: 26 de enero de 2016). Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909002761>>. ISSN 0306-2619. DOI 10.1016/j.apenergy.2009.06.037.2010.

COVENTRY, J.S. y LOVEGROVE, K. *Electrical and thermal output from a domestic PV / thermal system*. En: *Solar Energy*, 75: 63-72. DOI 10.1016 / S0038-092X(03)00231-7. 2003.

GARCÍA, R. y GONZÁLEZ, A. *Condiciones de forma y desempeño energético de viviendas unifamiliares en el centro sur de Chile 1 Form conditions and energy performance of single family housing in Central South Chile 1*. En: *Revista INVI*, 29 (80): 111-141 [en línea] Fecha de consulta: 26 de enero de 2016). Disponible en: <<http://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/790/1126>>. 2014.

GARCÍA, R.; WEGERTSEDER, P.; BAERISWYL, S. y TREBILCOCK, M. *Mapa Energético-Solar de Concepción: Cartografía Urbana del Consumo Energético y Captación Solar en Edificaciones Residenciales de Concepción, Chile 1*. En: *Norte Grande*, 59: 123-144. 2014.

HACHEM, C. *Investigation of Design Parameters for Increased Solar Potential of Dwellings and Neighborhoods*. Montreal, Concordia University, 2012. 260. p.

IEA. *Cities, Towns & Renewable Energy Cities, Towns* [en línea] Fecha de consulta: 26 de enero de 2016). Disponible en: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cities2009.pdf>>. 2009.

IEA SHC TASK 41. *Solar energy systems in architecture integration criteria and guidelines English* [en línea] Fecha de consulta: 26 de enero de 2016). Disponible en: <<http://leso2.epfl.ch/solar/pdf/SolThePh.pdf>>. 2012a.

IEA SHC TASK 41. *Solar energy systems in architecture SHC Task 41* [en línea] Fecha de consulta: 26 de enero de 2016). Disponible en: <<http://task41.iea-shc.org/data/sites/1/publications/T41DA2-Solar-Energy-Systems-in-Architecture-28March2013.pdf>>. 2012b.

IEA SOLAR HEATING & COOLING PROGRAM. *Compilation and analyze of interviews DA 1-2 Preliminary Outcome of PV / T market survey interviews* [en línea] Fecha de consulta: 26 de enero de 2016). Disponible en: <http://archive.iea-shc.org/publications/downloads/DA12_Outcome_of_PVT_market_survey_interviews.pdf>. 2007.

KAAN, H. y REIJENGA, T. *Photovoltaics in an architectural context*. En: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12 (6): 395-408. ISSN 10627995. DOI 10.1002/pip.554. 2004.

LUND, P. *Large-scale urban renewable electricity schemes - Integration and interfacing aspects*. En: *Energy Conversion and Management*, 63: 162-172 [en línea] Fecha de consulta: 26 de enero de 2016). Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.01.037>>. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2012.01.037. 2012.

LUQUE, A. y HEGEDUS, S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. West Sussex, John Wiley & Sons, 2011. 1132 p. ISBN 9780470721698.

MIKKOLA, J. y LUND, P.D. *Models for generating place and time dependent urban energy demand profiles*. En: *Applied Energy*, 130: 256-264 [en línea] Fecha de consulta: 26 de enero del 2016). Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.039>>. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2014.05.039. 2014.

MUNARI, C. *Architectural Integration and Design of Solar Thermal Systems*. Laussane . 2009.

OP 'T VELD, P. y VAN DER AA, A. *Driving forces of energy-related behaviour in residential buildings*. En: *WSB2014 (Ed.)*. Barcelona, GCNe, 2014, pp: 24-33.

SOLARWALL. *PV/Thermal; Hybrid Solar Heating + Electricity*. [en línea] Fecha de consulta: 3 de marzo de 2015] Disponible en: <<http://solarwall.com/en/products/pvthermal.php>>. 2015.

ZALAMEA, E. y GARCÍA, R. *Roof characteristics for integrated solar collection in dwellings of Real- Estate developments in Concepción, Chile*. En: *Revista de la Construcción Journal of Construction*, 36 (133): 36-44. 2014.

